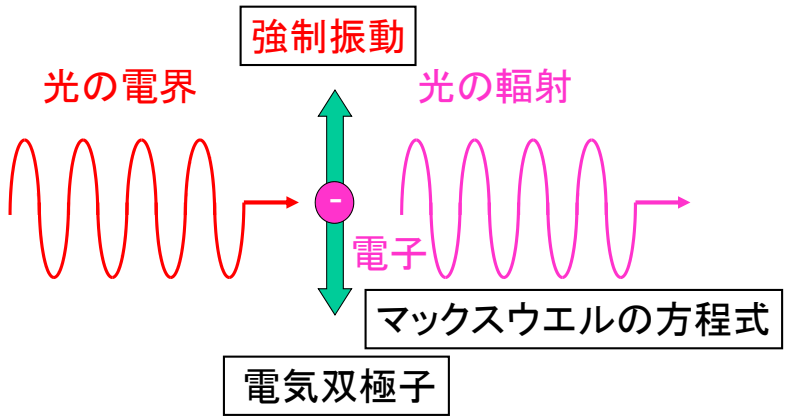
光量子エレクトロニクス特論

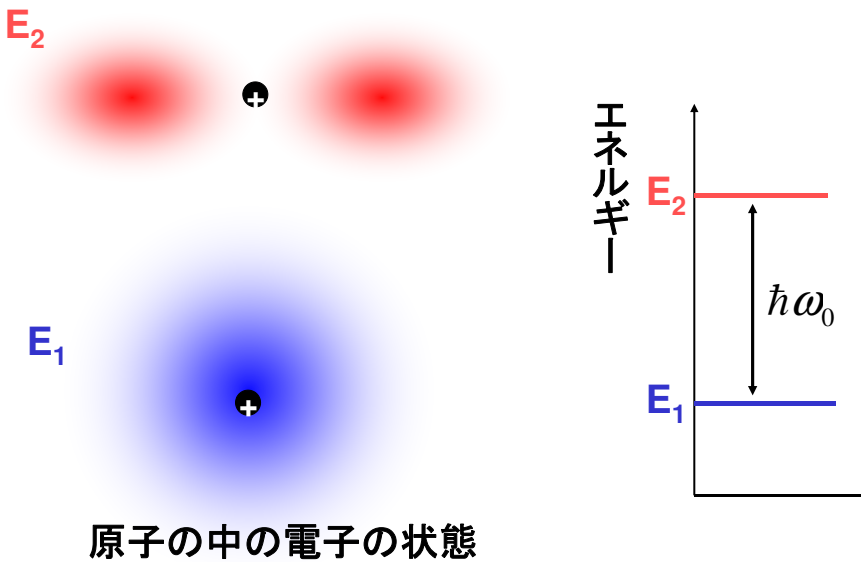
1. 電磁気学の復習
2. 量子力学の復習
3. 状態ベクトルとシュレディンガー方程式
4. 時間依存のシュレディンガー方程式
5. 密度行列法
6. 電子と光の相互作用-古典振動子モデル
7. 電子2準位系とブロッホ方程式
8. 電子2準位系におけるコヒーレント光非線形効果
9. 2原子分子のエネルギー準位
10. 固体のエネルギー準位
11. 光学遷移と次元性
12. 光学遷移におけるクーロン相互作用の効果
13. フラーレンの電子状態と光学遷移
14. ナノチューブの電子状態と光学遷移
15.まとめ

光と電子の相互作用



古典的振動子モデル

2準位系



原子の中の電子の状態

古典的振動子モデル

無電界



電界を加えると電子は E_1 の状態から E_2 に変化し、分極（Polarization）が生じる。



古典的振動子モデル

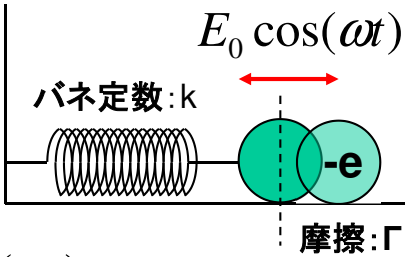
2準位系

電子の質量：m_e

電子の電荷：e

光の電場

$E_0\cos(\omega t)$



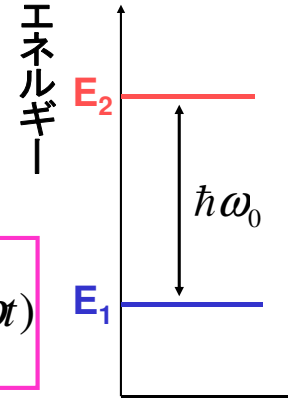
$$F = -eE_0\cos(\omega t)$$

$$m_e\frac{d^2x}{dt^2} = -\Gamma\frac{dx}{dt} - kx - eE_0\cos(\omega t)$$

古典的振動子モデル

$$\omega_0 \equiv \sqrt{\frac{k}{m_e}} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$$ **固有振動数**

$$\frac{\Gamma}{m_e} \to 2\gamma$$



$$\boxed{\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{eE_0}{m_e}\cos(\omega t)}$$

古典的振動子モデル

複素数で解く

置き換え： $\cos(\omega t) \to \exp(i\omega t)$

$$\boxed{\frac{d^2z}{dt^2} + 2\gamma\frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = -\frac{eE_0}{m_e}\exp(i\omega t)}$$

古典的振動子モデル

$$z(t) = \frac{eE_0}{m_e\left\{\omega^2 - \omega_0^{\,2} - 2i\gamma\omega\right\}}e^{i\omega t}$$

示せ！

$\omega \approx \omega_0$ **であれば**

$$z(t) \approx \frac{eE_0}{2m_e\omega_0(\omega - \omega_0 - i\gamma)}e^{i\omega t}$$

示せ！

古典的振動子モデル

分極: $P(t) = -Nez(t)$ **N:電子の密度**

$$= \frac{Ne^2}{2m_e\omega_0(\omega_0 - \omega + i\gamma)} E_0 e^{i\omega t}$$

$$= \frac{Ne^2(\omega_0 - \omega - i\gamma)}{2m_e\omega_0\{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\}} E_0 e^{i\omega t}$$

電気感受率: $\chi(\omega)$

$$P(t) \equiv \varepsilon_0 \chi\, E = \varepsilon_0 \chi\, E_0 e^{i\omega t}$$

$$\chi(\omega) = \frac{Ne^2(\omega_0 - \omega - i\gamma)}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\}}$$

物質中のマックスウエルの方程式

χ(ω):電気感受率 $\chi(\omega) = \frac{Ne^2(\omega_0 - \omega - i\gamma)}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\}}$

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$$

$$\chi'(\omega) = \frac{Ne^2(\omega_0 - \omega)}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\}}$$

$$\chi''(\omega) = \frac{Ne^2\gamma}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\}}$$

等方的な物質の場合

$\mathbf{P}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0\chi\mathbf{E}(\mathbf{r})$

電気感受率 ＞0 : 電場と同じ向き

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{P}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \varepsilon_0\chi\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0(1+\chi)\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

ε:物質の誘電率

物質の絶対屈折率: $n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{1} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{1+\chi} > 1$

$\longrightarrow n_0 - i\kappa$

複素屈折率

$\longrightarrow$ $n_0^2 - \kappa^2 = 1 + \chi'$

$2n_0\kappa = \chi''$

複素屈折率、複素感受率…

$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$

$n = \sqrt{1+\chi} = n_0 - i\kappa$

$\longrightarrow$ $n_0^2 - \kappa^2 = 1 + \chi'$

$2n_0\kappa = \chi''$

電磁波:平面波 $E = E_0 \exp\{i(\omega t - k_0 z)\}$

物質中では $k_0 \rightarrow k = nk_0$

$\exp\{i(\omega t - kz)\} = \exp(i\omega t)\exp(-ink_0 z) = \exp(i\omega t)\exp(-i(n_0 - i\kappa)k_0 z)$

$= \exp(i\omega t)\exp(-in_0 k_0 z)\exp(-\kappa k_0 z)$

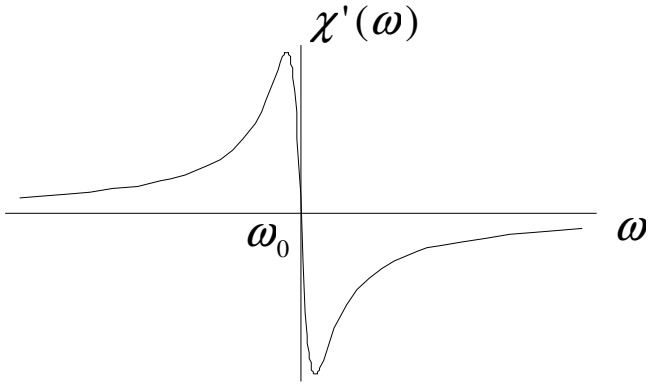
$\exp(-\kappa k_0 z)$:指数関数的に減衰

κ: 減衰係数 $\rightarrow$ 吸収に関係

- 屈折率(n_0)の変化が少ないところではκはχ''に比例
- 吸収(κ)が無いところではn_0は$\sqrt{(1+\chi')}$に比例

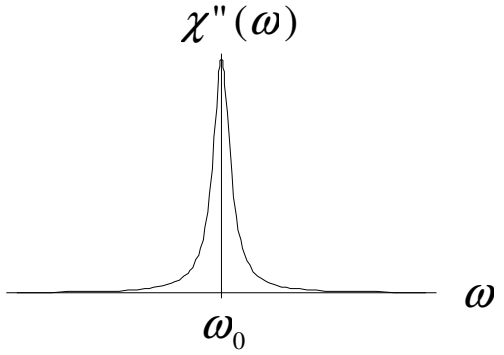
χ'(ω):電気感受率の実数部

$$\chi'(\omega)=\frac{Ne^2(\omega_0-\omega)}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\left\{(\omega_0-\omega)^2+\gamma^2\right\}}$$



χ''(ω):電気感受率の虚数部

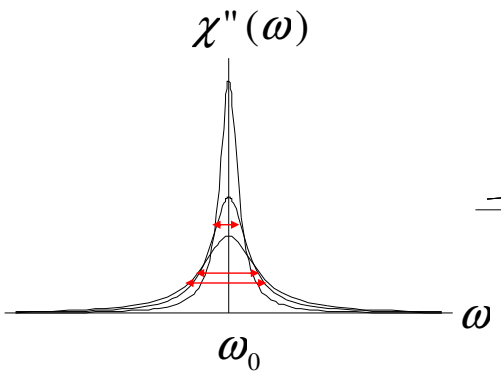
$$\chi''(\omega)=\frac{Ne^2\gamma}{2m_e\varepsilon_0\omega_0\left\{(\omega_0-\omega)^2+\gamma^2\right\}}$$



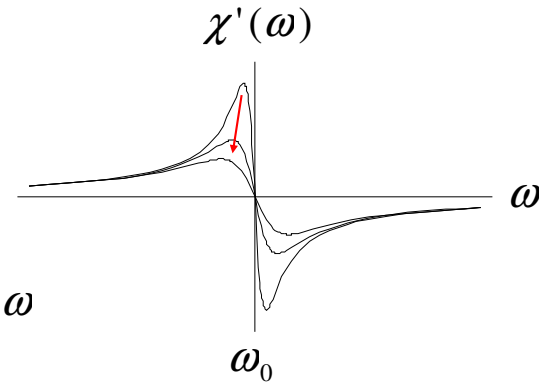
γの役割

γが大きくなると，吸収スペクトルの幅が
広がり、屈折率変化が小さくなる

光の吸収に関係



屈折率に関係



γの役割

γ：振動子に対する“摩擦”

分極を乱す作用→光吸収

$$\gamma=\frac{1}{T_2}$$

T_2　：位相緩和時間